

Введение

Общей особенностью радиолокационных и радиотехнических систем является наличие радиоканала и собственных (тепловых) шумов приёмника. Радиолокатор определяет координаты целей: дальность, пеленг и параметры движения и в первую очередь — доплеровскую частоту, связанную с радиальной скоростью цели.

Данная монография задумана автором как информационное издание для школы молодых изобретателей — учебное пособие, в котором обобщён личный опыт создания 18 изобретений, появившихся в ходе разработки конкретных технических систем. В ней предпринята попытка подробно рассмотреть логику формирования изобретательских решений, их алгоритмы, а также особенности построения технических устройств. Этому и посвящена настоящая работа [1–5].

Сегодня, по прошествии времени, становится очевидным, что научные и теоретические основы рассматриваемого направления остаются во многом неизменными. Это делает материал монографии актуальным как для начинающих разработчиков, так и для более опытных специалистов. Возникает естественный вопрос: почему при создании того или иного изобретения автор выбирал именно тот путь, хотя уже существовала теория решения изобретательских задач — ТРИЗ [1–4], а области радиолокации, связи и обработки сигналов были достаточно развиты?

В монографии поставлена задача разобраться в этом и взглянуть на творческий процесс, лежащий в основе формирования новых технических решений. Автор надеется, что представленный подход, реализованный в каждом изобретении, сможет принести несомненную пользу молодым инженерам и разработчикам при создании новых устройств и систем.

Сегодня инженерная идеология заметно изменилась: появились современные теории цифровой обработки и формирования сигналов, расширились аппаратные возможности. Тем не менее остаётся уверенность, что энергия и творческий потенциал молодых специалистов позволят им покорить новые вершины и

создать новые образцы техники. В процессе практического применения ТРИЗ особенно важно выявлять общие закономерности, понимать теоретические и аппаратные ограничения и уделять им внимание, чтобы открывать новые горизонты в совершенствовании изобретательского процесса.

В основной части монографии рассмотрена теория цифровых систем селекции движущихся целей (СДЦ), лежащая в основе изобретений автора в этой области. Представлены алгоритмы цифровой обработки сигналов: дискретизация, обнаружение, оценивание параметров и преобразование сигналов. Обращено внимание на системы контроля и технологии DRFM и DRFM-S.

В соответствии с поставленной целью в настоящей монографии будут дозировано даны сведения из теории цифровой рандомизированной обработки пространственно-временных (ПВ) сигналов для РЛС, рассмотрены вопросы создания конкретных устройств, построенных по этой теории. В качестве базовой будет взята теория обнаружения ПВ-сигналов, однако в ней будут учтены эффекты дискретизации и квантования. В терминологии Д. Миддлонта будет уточнена постановка задачи обнаружения при построении конкретных технических устройств.

В монографии будут рассмотрены конкретные технические устройства, защищенные 18 авторскими свидетельствами и которые существенно расширяют границы применимости теории, основанной на рандомизации ЦО путём искусственного и естественного «зашумления».

В Приложениях уточняется понятие «пеленгация», дается ряд основных аналитических соотношений, а также рассмотрен пример заявки на патент «Устройства создания активных помех» (а. с. № 2349926), предназначенного для создания имитационных помех когерентно-импульсным радиолокационным системам, реализующих технологии цифрового радиочастотного запоминания сигналов DRFM и пространственно-частотного запоминания направления (пеленга) DRFM-S.

1 Цифровые системы селекции движущихся целей

Понятие помехоустойчивости связано со способностью РЛС обнаруживать сигнал на фоне собственных шумов приёмника, однако основную проблему обработки представляют пассивные помехи — отражения от местных предметов и активные (внешние) помехи. Это понятие связано с помехозащищенностью, которое трансформируется в понятие помехоустойчивости после выполнения операции режекции («обеления») соответствующих помех.

1.1. Селекция движущихся целей — способ обработки радиолокационной информации

Важной составной частью современной РЛС является система селекции движущихся целей (СДЦ), основное назначение которой состоит в режекции пассивных помех (ПП) от неподвижных либо медленно движущихся объектов и выделении сигналов, отраженных от движущихся целей (например, самолетов, ракет). В системе СДЦ осуществляется преобразование радиолокационных сигналов из одной формы в другую с целью наилучшего обнаружения и оценки параметров сигналов движущихся целей.

По существу система СДЦ является главным звеном системы первичной обработки радиолокационной информации. Особенностью обработки сигналов в системе СДЦ является то, что при обнаружении сигналов движущихся целей используется информация о доплеровском смещении частоты, вызванном движением цели относительно РЛС.

Операции по обработке сигналов в системе СДЦ приходится осуществлять при наличии в принимаемом эхо-сигнале мощных помеховых отражений от неподвижных местных предметов (гор, леса, холмов, зданий, мачт, труб и т. п.), а также медленно движущихся гидрометеоров и организованных пассивных помех — дипольных отражателей (ДО). В этой связи выполнение предварительных операций первичной обработки, связанных с подавлением указанных помех, возлагается на систему СДЦ. Система СДЦ является наиболее важной составной частью всей системы обработки радиолокационной информации, осуществляющей

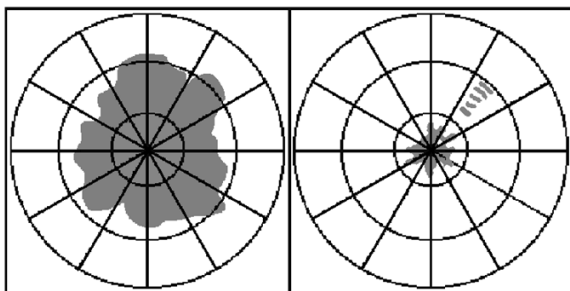


Рис. 1.1. Отраженные сигналы на индикаторе кругового обзора РЛС в координатах «дальность — азимут»

«очистку» принимаемого эхо-сигнала от мешающих помеховых отражений. Система СДЦ, подавляя эти отражения, создает благоприятные условия как для первичной, так и для последующей вторичной обработке.

Таким образом, система СДЦ представляет собой способ обработки радиолокационной информации, заключающейся в подавлении (режекции) помех от неподвижных (медленно движущихся) нежелательных объектов и выделения сигналов движущихся целей. Сигналы с выхода системы СДЦ подвергаются дальнейшей обработке с целью решения задачи обнаружения или непосредственно отражаются на экране индикатора (решение об обнаружении цели в этом случае принимает оператор).

Два рисунка индикатора кругового обзора РЛС иллюстрируют работу системы СДЦ (рис. 1.1). Слева показана обычная картина с видеосигналами от неподвижных предметов, справа — индикатор с включенной системой СДЦ. Состояние индикатора фиксировано за пять оборотов антенны, вследствие чего самолеты отобразились в виде последовательности пяти отметок. Эти рисунки показывают, насколько эффективным может быть применение системы СДЦ.

Импульсные радары, кроме дальности D и радиальной скорости V_r , измеряют пеленг θ (азимут α , угол места β), что показано на рис. 1.2, где S — апертура антенны на плоскости xoy , r — вектор направления прихода электромагнитного излучения.

Когерентно-импульсные радары, кроме этого, измеряют доплеровскую частоту $f_d = 2V_r/\lambda$, где V_r — радиальная скорость перемещения радара и цели; λ — длина волны.

Узкополосная шумовая преднамеренная помеха подавляет доплеровские каналы, однако имеет корреляцию по углу (ази-

мугу и углу места). Для подавления такой помехи необходимо в диаграмме направленности антенны формировать пространственный ноль. Однако при этом шумы приемника и АЦП становятся коррелированными, что необходимо учитывать.

Широкополосная шумовая преднамеренная помеха давит основной канал обнаружения (канал согласованной фильтрации по одиночным импульсам), однако также сохраняет корреляцию по углу. Сказанное относится и к помехам за счет отражений сигнала от местных предметов и дипольных отражателей.

Пассивные и активные помехи (АП) от местных предметов и дипольных отражателей имеют корреляцию по углу и «быстрому времени», поэтому в общем случае требуется 3-координатная ПВ-обработка.

Способность разделить сигналы и помехи за счет их различий в исследуемом пространстве дает возможность процессору обработки выделить цель, в то же время подавляя помеху. Конечная цель радара и процесса обработки, используя различия в корреляционных свойствах сигналов и помех, обеспечить максимальное отношение q_1^2 в многомерном пространстве, таким образом, увеличивая вероятность обнаружения.

Корреляционные свойства шумов квантования (в общем случае помех дискретизации) также отличаются от аналогичных свойств сигналов и помех (цветного шума), в особенности, когда используются грубые отсчеты.

Поэтому, как будет показано ниже, конечной целью радара является обеспечение максимального отношения q_2^2 в многомерном пространстве и, соответственно, увеличение вероятности правильного обнаружения P_d при условии $P_f \leq \eta$.

Рис. 1.3 демонстрирует влияние различий компонентов обрабатываемого сигнала на процесс обнаружения цели, например, в рамках традиционного Фурье-анализа.

На этом рисунке в координатах X, Y, Z представлено обобщенное спектральное преобразование — являющееся объемной

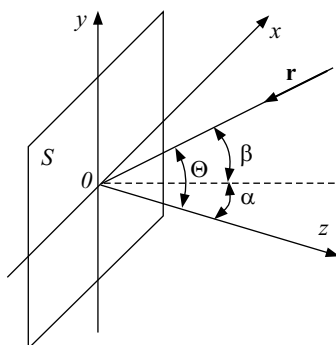


Рис. 1.2. Взаимосвязь угловых параметров прихода электромагнитной волны с координатами апертуры ФАР

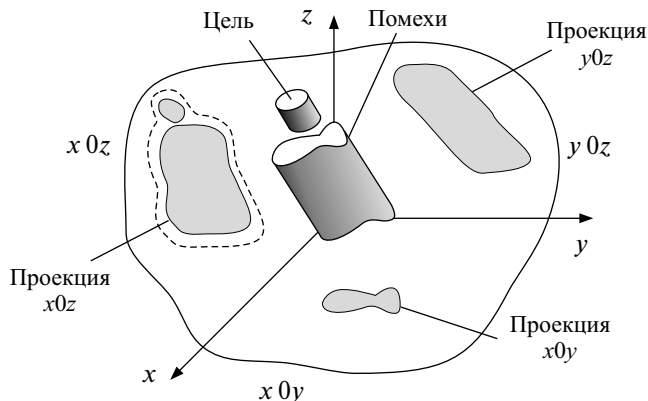


Рис. 1.3. Иллюстрация влияния спектральных различий сигнала с помехами, когда цель видна отдельно и обнаруживается легче на плоскости XoZ (пунктиром обозначена зона для «быстрого времени»)

спектральной плотностью мощности. Координаты X, Y, Z — пространственные частоты.

Обратим внимание на возможность выделения цели на фоне обобщенного класса помех (сигнально-помеховых составляющих) в объемном пространстве. Проецируя данные на любую плоскость, мы можем увидеть эффекты «забивания» помехой, однако на других плоскостях возможно их разделение (см. плоскость XoZ). В объемном пространстве можно сконструировать фильтр, чтобы обеспечить максимум усиления для сигнала цели и нулевое усиление для соответствующей помехи, включая помехи дискретизации или квантования.

Потенциальные возможности разрешения многомерных сигналов — множеств (пространственно-протяженных зон) в обобщенном спектральном пространстве определяются размерами окон ПВ-выборок, и в динамике (по мере увеличения их размеров) ситуация от полного неразрешения (когда размеры выборок малы, см. пункт на рис. 1.3) переходит к ситуации, изображенной на вышеуказанном рисунке, когда разрешение возможно. Главный вопрос заключается в том, какие энергетические потери q_2^2 возникает при этом, и какова доля в них шумов квантования.

Основные положения относятся к теории цифровой стохастической обработки пространственно-временных радиолокационных сигналов в условиях искусственной хаотизации цифровой обработки (ЦО) — зашумления грубых (малоразрядных и бинарных) отчетов (ГО). При рандомизации цифровой обработ-

ки сигналов (задания вероятностной меры), ГО превращаются в грубую статистику (ГС), усредняемую сглаживаемую. Шумы квантования и дискретизации доводятся до уровня собственных шумов приемника.

В настоящей работе рассмотрен наиболее общий тип систем СДЦ — когерентно-импульсные системы. Эти системы различают движущиеся и неподвижные цели за счёт межимпульсного сравнения доплеровского сдвига фазы, возникающего при движении объекта. В когерентно-импульсной РЛС доплеровский сдвиг определяется как изменение фазы сигнала между двумя соседними зондированиями. Очевидно, что для неподвижных или медленно движущихся целей фаза сигнала практически не изменяется и сигналы от таких объектов могут быть эффективно скомпенсированы методом чрезмерного вычитания.

1.2. Цифровые системы СДЦ

1.2.1. Принцип работы простейшего устройства СДЦ

Обратимся к рис. 1.4, который поясняет принцип работы доплеровского радара.

Радиолокатор излучает импульс высокочастотной энергии, который отражается, например, от холма или самолета. Отраженный эхо-сигнал поступает на вход приемника с некоторым запаздыванием, обусловленным распространением электромагнитной волны от РЛС и обратно. Затем радиолокатор излучает второй импульс. Отраженный от холма сигнал возвращается че-

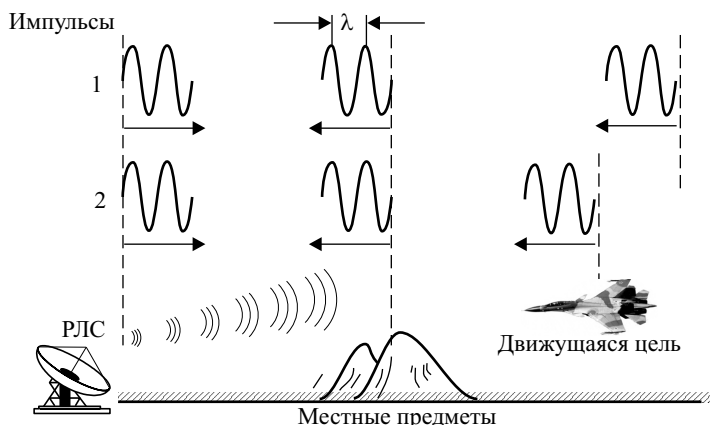


Рис. 1.4. К образованию доплеровского набега фазы, вызванного движением цели

рез точно такое же время, что и в первом зондировании, так как дальность до него не изменяется, а сигнал, отраженный от самолета, возвращается раньше, так как самолет движется к радиолокатору и за время между двумя зондированиями он успевает несколько приблизиться. Хотя расстояние, на которое перемещается самолет, является незначительным, однако перемещение даже на четверть длины волны λ приводит к изменению фазы отраженного эхо-сигнала на 180° . Точное время, за которое отраженный сигнал достигнет РЛС, не имеет большого значения. Важно другое — изменяется ли это время от зондирования к зондированию.

Изменение времени, составляющего величину порядка нескольких наносекунд, выявляется путем сравнения фазы принятого сигнала с фазой опорного генератора (когерентного гетеродина) в фазовом детекторе. Для неподвижных объектов фаза принимаемых сигналов от зондирования к зондированию не изменяется и это обстоятельство учитывается при компенсации помех.

На рис. 1.5 показана упрощенная структурная схема когерентного импульсного радиолокатора с усилением на промежуточной частоте. В его состав входит простейшее устройство СДЦ в виде череспериодного компенсатора.

Эхо-сигнал от неподвижной цели имеет постоянный фазовый сдвиг относительно переданного импульса, поэтому изменения фазы от импульса к импульсу не происходит. Для движущейся цели фазовый сдвиг будет изменяться от одного зондирующего импульса к другому, вследствие чего огибающая выходного сигнала образует «биения» в виде доплеровского гармонического сигнала.

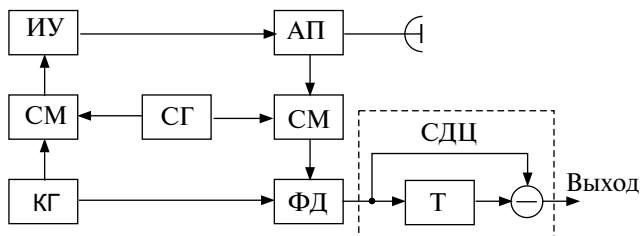


Рис. 1.5. Структурная схема когерентно-импульсной РЛС: ИУ — импульсный усилитель, СМ — смеситель, КГ — когерентный гетеродин, СГ — стабильный гетеродин, АП — антенный переключатель, ФД — фазовый детектор, Т — линия задержки на период зондирования РЛС, А — антенна

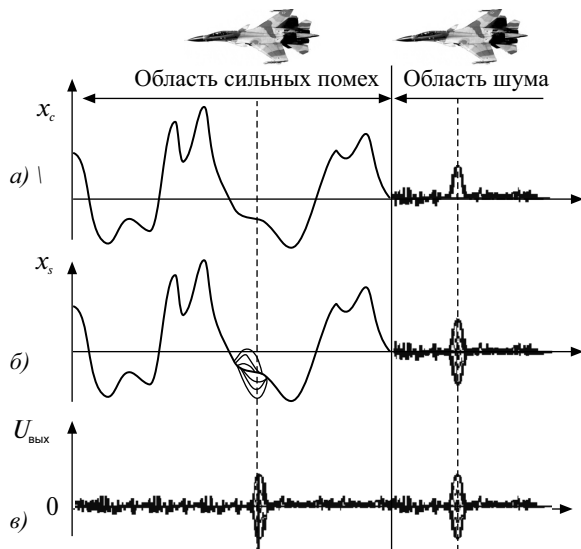


Рис. 1.6. Эпюры отраженных эхо-сигналов для одного (а) и семи (б) зондирований на выходе приёмника РЛС и на выходе системы СДЦ (в)

Биполярный сигнал на выходе фазового детектора несет в себе информацию о фазе и амплитуде принимаемого сигнала. Биполярный сигнал, сформированный при приеме единственного передаваемого импульса, изображен на рис. 1.6,а. Если мы наблюдаем точечную перемещающуюся цель на фоне сильных отражений от неподвижных предметов, то при приеме нескольких передаваемых импульсов видеосигнал может иметь вид, показанный на рис. 1.6,б.

На рис. 1.6,в представлен видеосигнал на выходе устройства СДЦ. Временная диаграмма (рис. 1.6,в) получена в предположении, что сигналы пассивных помех являются нефлюктуирующими, в противном случае — на выходе устройства СДЦ в зонах помех могут появиться нескомпенсированные остатки.

Простейшее устройство СДЦ может быть построено на основе череспериодного вычитания сигналов, полученных в двух соседних зондированиях для каждой точки дальности РЛС. Для реализации простейшего устройства СДЦ необходимо найти способ запоминания, чтобы осуществить сравнение сигналов в двух соседних зондированиях.

Более сложное устройство представляет собой последовательное соединение двух схем однократной череспериодной ком-

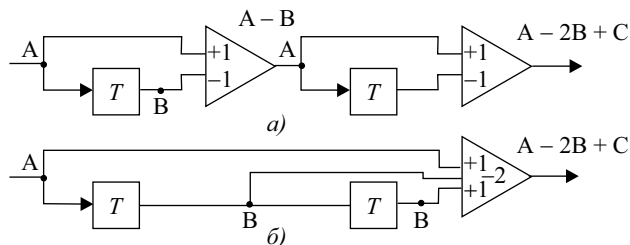


Рис. 1.7. Структурная схема простейшей системы СДЦ 2-го порядка

пенсации (рис. 1.7,а). Его можно назвать трехимпульсным, поскольку в нем одновременно обрабатывается три зондирования: А — текущее, В — задержанное на один период и С — задержанное на два периода. Схема устройства СДЦ, изображенная на рис. 1.7,а, эквивалентна схеме, представленной на рис. 1.7,б, где зондирования А, В и С представлены в явном виде.

Из рассмотрения простейших устройств СДЦ становится ясным, что основными элементами структурной схемы цифровой системы СДЦ являются: аналого-цифровой преобразователь (АЦП), запоминающее устройство (ЗУ) и арифметическое устройство (АУ), при этом АЦП осуществляет квантование эхо-сигналов отдельных зондирований по времени и уровню (квантование по времени в соответствии с теоремой отсчетов: две выборки за длительность импульса, а квантование по уровню — в соответствии с требуемым качеством подавления помех), ЗУ реализует элемент задержки на период T и может быть построено в виде регистра сдвига или адресного устройства памяти на микросхемах, АУ реализует требуемый алгоритм обработки эхо-сигналов трёх зондирований в каждой точке дальности.

Совокупность устройств АЦП, ЗУ и АУ по существу представляет собой цифровой фильтр, осуществляющий режекцию сигналов от неподвижных объектов, и выделение сигналов движущихся целей. Степень фильтрации сигналов от неподвижных целей, качество фильтрации, зависит от структуры цифрового фильтра, которая должна быть оптимальной.

Цифровой фильтр в виде каскадного соединения схем однократной череспериодной компенсации позволяет существенно расширить полосу режекции пассивных помех, оставаясь по существу оптимальным только для тех значений скоростей цели, при которых фаза отраженного сигнала изменяется на 180° , т. е. этот фильтр оказывается настроенным только на «оптимальные»

скорости целей. Обеспечить обнаруживаемость полезных сигналов в более широком диапазоне скоростей целей позволяют многоканальные когерентные накопители, отдельные каналы которых настраиваются на доплеровские частоты, перекрывающие более широкий диапазон скоростей. Когерентные накопители могут либо непосредственно выполнять функции цифрового компенсатора СДЦ за счет подавления сигналов каналов, соответствующим неподвижным и медленно движущимся объектам, либо включаться после компенсатора СДЦ с целью улучшения эффективности выделения сигналов. В последнем случае удается осуществить дополнительную режекцию помех, а так же сделать более равномерной скоростную характеристику. Кроме того, такая обработка придает цифровой системе СДЦ те преимущества, которая когерентная обработка имеет перед некогерентной. Каналы когерентного накопителя в системе СДЦ необходимы лишь для более качественного решения задачи СДЦ. Аналогичные рассуждения и вытекающие из них выводы, можно провести относительно режекции активных помех.

1.2.2. Структурная схема цифровой системы СДЦ

На рис. 1.5 была приведена схема когерентного импульсного радиолокатора, выходным каскадом которого является фазовый детектор.

На ФД для сравнения по фазе на промежуточной частоте поступает принятый эхо-сигнал и сигнал когерентного гетеродина (КГ). На выходе ФД, обычно реализуемого по квадратурной схеме, формируется комплексный сигнал

$$\dot{x}(t) = x_c(t) + jx_s(t),$$

где $x_c(t) = x(t) \cos \varphi(t)$ и $x_s(t) = x(t) \sin \varphi(t)$ — реальная $\text{Re}\{\dot{x}(t)\}$ и мнимая $\text{Im}\{\dot{x}(t)\}$ квадратурные составляющие входного сигнала, а $x(t) = +\sqrt{x_c^2(t) + x_s^2(t)}$, $\varphi(t) = \text{arctg} \frac{x_s(t)}{x_c(t)}$ — огибающая и фаза.

Сигнал $\dot{x}(t)$ представляет собой аддитивную смесь полезного сигнала $\dot{s}(t)$, помехи $\dot{c}(t)$ и шума $\dot{n}(t)$:

$$\dot{x}(t) = \mu_s \dot{s}(t) + \mu_c \dot{c}(t) + \dot{n}(t), \quad (1.1)$$

где μ_s, μ_c — индикаторы событий, принимающие значения 0 или 1.

Если $\mu_c = 0$, а $s(t) \gg n(t)$, то $\varphi(t) = \omega_d t + \varphi_0$. Здесь $\omega_d = 2\pi f_d$ — круговая доплеровская частота; $f_d = 2V_p/\lambda$ — доплеровская частота; V_p — радиальная скорость движения цели; λ — длина волны.